

鉄筋コンクリート造ト形柱・梁接合部の立面形状を 考慮した終局強度と建物の耐震性

著者	迫田 丈志
号	55
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工第2222号
URL	http://hdl.handle.net/10097/62065

氏 名 さくた じょうじ 迫田 丈志
授 与 学 位 博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日 平成23年3月9日
学位授与の根拠法規 学位規則第4条第2項

学 位 論 文 題 目 鉄筋コンクリート造ト形柱・梁接合部の立面形状を考慮した
終局強度と建物の耐震性
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 井上範夫 東北大学教授 植松 康
東北大学准教授 前田匡樹 東北大学准教授 五十子幸樹

論 文 内 容 要 旨

鉄筋コンクリート (RC) 造ラーメン架構を形成するト形柱・梁接合部が地震時に損傷し破壊することは、建物全体を崩壊に至らしめる極めて危険な被害に直結するため、大地震時においても絶対に避けなければならない。しかし、現行の耐震設計基・規準の接合部せん断強度式は、柱せい (D_c) と梁せい (D_b) がほぼ等しい正方形接合部の実験結果を基に導かれたものであり、接合部立面形状 (D_b/D_c) が正方形でない場合についてはほとんど検討されず評価できない。特に、接合部が縦長 ($D_b/D_c > 1$) になるほど、接合部の圧縮ストラット角度が高くなり、接合部強度が低くなることが予想される。更に、接合部を剛体として扱う現行の骨組解析では、接合部変形を無視または剛域入り長さとして考慮しているために層間変形角に与える影響を適切に評価できているとは言い難い。

以上の背景から本研究では、RC 造ト形柱・梁接合部のせん断破壊を対象とし、柱せいと梁せいによって定まる接合部立面形状がせん断強度や剛性に影響するということを実験的および解析的に明らかにした上で、ト形柱・梁接合部せん断強度式を構築し、建物の耐震安全性を確保するための接合部せん断設計法を確立することを目的とする。

本論文は6章から構成されている。

各章において得られた結論について下記にまとめて記す。

第1章は、序論として研究の背景と目的を述べ、既往の研究について整理した。RC 造柱・梁接合部やせん断強度式を対象とした既往の研究から、本研究と関連のある以下の6つのテーマについてまとめ、本研究の意義・目的を示した。

- 1) RC 造ト形接合部の終局強度に関する研究
- 2) 梁主筋の定着に関する研究
- 3) 十字形接合部の終局強度に関する研究
- 4) 柱せいと梁せいが異なる接合部に関する研究
- 5) RC 部材のせん断強度式に関する研究
- 6) 接合部の復元力特性と建物の耐震性に関する研究

その結果、ト形接合部の破壊は建物全体の崩壊に繋がることや、接合部の立面形状に関する研究が殆ど行われていないが、一部の研究で縦長になると強度が低下する傾向が示されていること等を記した。

第 2 章では、RC 造ト形柱・梁接合部の構造性能に関して、立面形状の変化に対する現行式の適合性と問題点を検討するために、ト形接合部に作用する応力や既往の接合部せん断強度式、接合部復元力特性のモデル化手法、層間変形角に占める接合部変形割合の算定方法について概説し、検討した。

その結果、接合部内の配筋は柱・梁よりもかなり少ないにも関わらず、接合部せん断力は柱・梁のせん断力と比較して数倍大きくなることを示した。この影響は、階高に対する梁有効せいの比や、スパンに対する柱有効せいの比によって表され、比が小さいほど接合部せん断力が柱・梁せん断力よりも大きくなる。

現行の接合部せん断強度式については、コンクリート強度と有効断面積の影響のみ考慮された正方形接合部の実験回帰式であり、接合部立面形状や接合部配筋の効果が反映されないことを指摘した。接合部の圧縮ストラットをトラス部材にモデル化すると、その立面形状が縦長になるほど接合部せん断強度が低下することを明示した。

剛性については、接合部を剛域として部材入り長さを考慮するか、あるいは日本建築学会「靱性保証型耐震設計指針」に示されるせん断剛性として考慮することとなる。第 2 剛性の影響係数としては横補強筋や柱中段筋の影響も考慮することができる。しかし、立面形状の影響については指摘されているものの、影響係数としては考慮されていない。立面形状が縦長になれば、柱・梁部材と同様に曲げ変形の影響も現われると考えることができる。特に基礎梁等、柱せいに比べて梁せいが 2 倍以上となるような接合部では、その影響が大きくなることが予測される。

接合部変形が層間変形角に与える影響については、全ての部材が弾性である場合についての現行評価式を示し、立面形状の影響について示した。接合部せん断力が柱・梁よりもかなり大きく、小さな地震力、小さな層間変形角においてひび割れが生じることを考えると、接合部変形が層間変形角に与える影響は更に大きくなることが予想される。

接合部の横補強筋については、「建築基準法」や日本建築学会「RC 規準 2010」では 0.2%の最小横補強筋比と間隔(150mm 以下かつ柱帯筋の 1.5 倍以下)、日本建築学会「終局強度型設計指針」や同「靱性保証型耐震設計指針」でも 0.3%の最小横補強筋量が定められるが、強度式には反映されないことを示した。

第 3 章では、ト形柱・梁接合部の立面形状とひび割れ、破壊性状、せん断強度、鉄筋ひずみ、復元力特性の関連性を把握し、立面形状がせん断強度に与える影響を定量化することを目的として、ト形部分架構の正負交番繰返しによる静的載荷実験を行い、検討した。

実験の結果、接合部のひび割れは、まず柱・梁の引張側入隅部に生じ、その後、梁主筋定着板から柱梁圧縮位置への対角ひび割れと斜め 45 度のひび割れが生じる。最終破壊時には対角ひび割れが大きく開き、立面形状に比例したひび割れ角度となることを示した。せん断強度時の破壊面が対角ひび割れと一致したため、立面形状と破壊面の関係を明らかにした。

接合部せん断強度については、立面形状が縦長になるとせん断強度が低下すること、縦長接合部の横補強筋量を増すとせん断強度が増加することを示し、せん断破壊時のせん断応力度が立面形状によって変化していることを明らかにした。

横補強筋は接合部立面形状によらず降伏したこと、柱中段主筋の歪度は柱危険断面の平面保持を仮定した曲げ解析から得られる歪値を大きく上回ったことを示し、せん断強度への鉄筋の効果について示唆した。

更に、最大強度時のせん断抵抗機構を把握するために、主筋歪と荷重からコンクリート圧縮力の大きさと作用位置を算出し、圧縮領域幅を仮定して接合部内の圧縮ストラット形状を算定した。その結果、コンクリート圧縮ストラットの幅 W_s や角度 θ は、接合部立面形状に比例し定着長さ L_d や柱せい D_c 、梁せい D_b によって表されることが分かった。

接合部剛性については、縦長になるほど低くなる傾向が見られ、曲げ変形を考慮した等価せん断剛性によって立面形状と剛性の関係を評価した。その結果、実験から計測したせん断応力度－せん断変形角関係 ($\tau-\gamma$) における剛性と良く適合した。

層間変形角に占める接合部変形成分については、縦長になる程その割合が多くなり、横補強筋比が大きい程その割合は少なくなることを示した。この傾向は既往の第 2 剛性評価式に反映されている。

第 4 章では、ト形接合部の立面形状の影響と接合部内に配筋された鉄筋の効果を評価することができるせん断強度式について、第 3 章で得られた実験結果と、既往の柱・梁せん断強度式として提案されているアーチトラス理論を元に提案し、実験結果との比較やパラメータ解析によって検証した。

アーチ機構については、柱では水平せん断力、梁では鉛直せん断力のみを考慮している既往式に対して、横長と縦長を同時に考慮でき、鉛直せん断力と水平せん断力の両方を評価できるように、コンクリート圧縮力作用位置を仮定して対角に結んだ角度とアーチ角を一致させ、実験結果から推定した接合部アーチ幅においてせん断強度となるように定めることとした。その結果、アーチ角度が 45 度のときに最大値を与え、45 度（正方形に近い接合部）から離れるほど、その強度が低下する式を提案した。また、アーチ角度や幅は、第 3 章で示したストラット幅や角度の実験結果と遜色なく、ひび割れ発生位置と対応することを示した。

トラス機構については、せん断補強筋の効果を考慮する既往式に対して、接合部横補強筋と柱中段筋の両方の効果を、立面形状の変化とともに考慮できる機構として修正した。

横長になる程、柱中段筋の効果が増し、縦長になる程横補強筋の効果が増す。トラス角については、既往式におけるトラス角 ($1 \leq \cot \phi \leq 2$) およびコンクリートと鉄筋の釣合から定まるトラス角 ($\cot \phi \leq [\nu \sigma_B / p_w \sigma_{wy} - 1]^{0.5}$) に加えて、立面形状の影響 ($\cot \phi \leq D_b / D_c$) を取り入れた。この制限によって縦長接合部ではトラス角がアーチ角よりも立つことがなくなり、横長ではトラス角がアーチ角よりも低くなることなくなくなる。

アーチ機構とトラス機構の加算による接合部アーチトラス式は、有効圧縮強度を柱・梁で用いられている有効圧縮強度係数によって評価した結果、実験における最大強度に対して、立面形状とせん断応力度の関係を適切に評価することができた。また、横補強の効果についても適切に評価した。

更に、提案式を用いたパラメータ解析を実施し、立面形状とせん断強度の関係や、補強筋効果、既往式との関係について考察した。その結果、正方形接合部においてアーチ強度の極値があり、横長になるほどトラス機構による柱中段主筋の効果が大きく、縦長になるほど横補強筋の効果が大きくなることを指摘した。正方形接合部では既往式と同等の結果となり横補強効果が小さいことや、縦長接合部では現行補強量では強度が低下すること、一方、縦長接合部では横補強量($p_{jw} \sigma_{wy} / \nu \sigma_B$)の効果が正方形に比べて大きく、横補強筋を増やすことで正方形接合部と同程度の強度を発揮できることを明らかにした。

第5章では、ト形接合部復元力特性の非線形性が建物の耐震性に与える影響を把握し、立面形状が変化するト形接合部のせん断余裕度を適切に評価することの重要性を示すことを目的として、架構の地震応答解析を行った。接合部の解析モデルは一般的な剛域モデルに対して、接合部復元力特性を考慮できるブレース置換モデルを用いた。ブレース復元力特性が接合部復元力特性と一致するようにひび割れ点、せん断強度、剛性を第3章、第4章の評価方法を適用して定めた。

荷重増分解析の結果、正方形接合部を有する架構では、接合部がひび割れによって非線形化しても損傷限界時の接合部変形が層間変形角に及ぼす影響は10%程度であり、せん断余裕度が確保されていれば従来の剛域(1/4)D入モデルで評価しても同等の結果となる。一方、縦長接合部では、既往式に対して、接合部せん断強度と剛性の低下が予測される。この影響から、想定する全体崩壊メカニズムが層崩壊メカニズムになる危険性を示した。全体崩壊メカニズムを形成するためには、補強筋によってせん断強度を上げ、接合部アーチトラス式によるせん断強度が梁曲げ強度を上回るように設計しなければならない。 $D_b/D_c=2$ となる縦長接合部では、横補強量 $p_{wj} \sigma_{wy} / \nu \sigma_B=0.18$ としてせん断余裕度を確保する必要がある。

地震応答解析の結果、接合部のせん断力とせん断変形は柱のそれとは逆向きに生じ、その増大によって建物の応答が大きくなることを示した。また、縦長接合部において提案式によるせん断余裕度が1.0未満となる場合には、建物地震応答が特定の階で過大となる危険性があるため、横補強量を増してせん断余裕度を1.0以上として応答変形を抑え、崩壊メカニズムを全体崩壊型とする必要があることを明らかにした。

これによってト形接合部の破壊による層崩壊を回避し、建物の耐震安全性を確保することができる。

第6章では、本論文全体をまとめ、結論と今後の課題を述べた。

論文審査結果の要旨

鉄筋コンクリート造ト形柱・梁接合部が地震時に損傷し破壊することは、建物全体を崩壊に至らしめる極めて危険な被害に直結するので、その耐震性評価は重要であるが、現行の耐震設計基・規準の接合部せん断強度式では柱せいと梁せいから定まる接合部立面形状の影響は考慮できない。これに鑑みて、本論文は、接合部立面形状と補強筋の効果を取り入れた終局強度式を提案し、実験による検証と、解析による建物応答への影響を検討したもので、全6章よりなっている。

第1章は序論である。

第2章では、鉄筋コンクリート造ト形柱・梁接合部の構造性能に関して、立面形状の変化に対する現行式の適合性と問題点を検討し、立面形状が縦長になると接合部せん断強度が低下することや、接合部せん断補強筋が強度上昇に寄与することを評価しうる手法の必要性を指摘している。

第3章では、ト形柱・梁接合部の立面形状、コンクリート強度、接合部せん断補強量をパラメータとした鉄筋コンクリート造試験体を対象として、正負交番の繰り返し静的載荷実験を行い、接合部の形状と接合部ひび割れ角度の関係やせん断強度への補強筋の効果を求め、さらに、実測値を基にして接合部内の圧縮ストラット形状を算定し、立面形状を反映したト形柱・梁接合部の耐力機構を明らかにしている。

第4章では、アーチトラス理論を基として、ト型接合部の立面形状の影響と接合部内に配筋された鉄筋の効果を評価することができるせん断終局強度式を提案し、実験結果との比較やパラメータ解析により、その有効性を明らかにしている。その結果、正方形接合部においては既往式と同等の結果であり、縦長接合部においては、現行のせん断補強量ではせん断強度が低下すること、さらに、せん断補強筋量を増やすことにより、正方形接合部と同程度の強度を発揮できることを示している。

第5章では、立面形状を変化させたト型接合部を有する鉄筋コンクリート架構を設定して地震応答解析を行い、ト型接合部のせん断余裕度を適切に評価することの重要性を指摘している。さらに、縦長接合部では、本提案式によるせん断余裕度が1.0未満となる場合には、建物地震応答が特定の階で過大となる危険性があるため、せん断補強筋量を増してせん断余裕度を1.0以上にして応答変形を抑え、崩壊メカニズムを全体崩壊型とする必要があることを指摘している。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は、鉄筋コンクリート造ト形柱・梁接合部を対象として、接合部の立面形状の影響を反映しうるせん断終局強度式を提案し、地震応答解析を行ってその有効性を示すものであり、鉄筋コンクリート建物の地震時安全性を向上させることに寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。